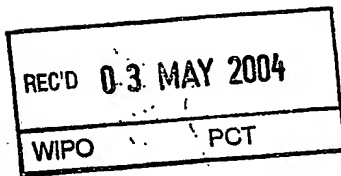


**BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND****PRIORITY  
DOCUMENT**SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

BEST AVAILABLE COPY

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 103 14 389.0

**Anmeldetag:** 28. März 2003

**Anmelder/Inhaber:** Siemens Aktiengesellschaft, 80333 München/DE

**Bezeichnung:** Regelung der GT im Wet Compression Betrieb

**IPC:** F 02 C 9/00

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 13. April 2004  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
**Der Präsident**  
 Im Auftrag

Sieck

# Regelung der GT im Wet Compression Betrieb

## 1 Problemstellung

Im Rahmen verschiedener FuE Projekte entwickelt Siemens PG Wet Compression zur Leistungs- und Wirkungsgradsteigerung der GT-Flotte.

Prinzipiell beruht die Leistungs- und Wirkungsgradsteigerung auf dem thermodynamischen Effekt der kontinuierlichen Kühlung des Verdichters. Dabei gelangt ein Großteil des eingespritzten Wassers flüssig in den Verdichter und entzieht der verdichteten Luft kontinuierlich Wärme in Folge der Tröpfchenverdampfung. Die kontinuierliche Abkühlung der Verdichterluft führt thermodynamisch zu einer deutlichen Anhebung der GT-Leistung und des GT-Wirkungsgrades.

Das flüssige Wasser wird als <sup>≙ dest. Wasser</sup> Deionat über ein Düsenrack in das GT-Ansaughaus eingespritzt und wird dabei in sehr kleine Tröpfchen verdüst (Spraynebel). In Abhängigkeit der angesaugten Außenluftfeuchte verdampft zwangsläufig ein Teil des eingespritzten Wassers bereits im Ansaughaus. Dieser als EVAP-Effekt bezeichnete Vorgang führt dazu, dass die Ansaugluft bereits vor Eintritt in den Verdichter abkühlt. Da die Temperatur am Verdichtereintritt direkt den angesaugten Massenstrom der GT bestimmt, wirkt sich dieser Effekt ebenfalls leistungssteigernd aus.

### 1.1 Regelung der GT

Die Siemens PG GTs werden mittels einer ATK-Regelung so geregelt, dass eine zulässige ISO-Turbineneintrittstemperatur nicht überschritten werden. Die Regelung der ATK geschieht nach der folgenden Formel:

$$T_{ATK} = T_{AT} - 0.46 \cdot T_{v1} \quad (\text{meist Vx4.2}) \quad (1)$$

$$T_{ATK} = T_{AT} - k1 \cdot T_{v1} - k3 \cdot T_{v1}^2 \quad (\text{Vx4.3Ay}) \quad (2)$$

Die Regelgröße  $T_{ATK}$  wird im Rahmen von thermodynamischen Messungen ermittelt. Die  $T_{AT}$  beschreibt die Austrittstemperatur des Rauchgases in der MBA-Ebene direkt hinter der Turbine. Mit  $T_{v1}$  wird die Verdichtereintrittstemperatur bezeichnet, die in der Regel mit 4 Thermoelementen direkt oberhalb des Verdichtereintrittskonus gemessen wird. Konstruktionsbedingt muß das WetC Rack immer oberhalb der Tv1-Elemente angebracht werden.

### 1.2 Problembeschreibung

Die Wassereinspritzung in den Verdichter wirkt sich direkt auf die Tv1-Messung und entsprechend auf die ATK-Regelung der GT aus (unabhängig von Gleichung 1 oder 2):

- 1) Das WetC Prinzip beruht darauf, dass das im Ansaughaus eingespritzte Wasser größtenteils flüssig in den Verdichter gelangt. Es stellt sich das Problem, dass das Wasser eine von der angesaugten Luft deutlich abweichende Temperatur hat und es prinzipiell keine Möglichkeit gibt die Thermoelemente zur Messung der Tv1 vor Feuchtigkeit (flüssiges Wasser) zu schützen. Die Folge ist, dass im WetC Betrieb nicht die reale Verdichtereintrittstemperatur sondern eher die Wassertemperatur gemessen wird. Auch Schutzrohre um die Thermoelemente herum beheben das Problem nicht, da letztlich die mit Wasser benetzte Temperatur der Schutzrohre gemessen wird. Eine Möglichkeit das Problem zu umgehen besteht darin, die Thermoelemente oberhalb des WetC Racks zu positionieren, um dem Einfluss des Wassers zu entgehen. Das unter 2) beschriebene Problem würde dennoch weiterhin bestehen.

- 2) Verschärfend wirkt sich aus, dass ein Teil des Wassers im Ansaughaus evaporiert. Wie groß der Anteil ist, ist eine Funktion der Luftfeuchte des angesaugten Luftmassenstromes und des Wirkungsgrades der Aufsättigung (EVAP Wirkungsgrad). Der Wirkungsgrad ist gemäß Gleichung 3 definiert als das Verhältnis der tatsächlichen Abkühlung bezogen auf die maximal mögliche Abkühlung. Die tatsächliche Abkühlung wird bestimmt aus der Differenz der Umgebungstemperatur ( $T_{amb}$ ) und der Verdichtereintrittstemperatur ( $T_{v1}$ ). Die Temperatur  $T_{WetBulb}$  beschreibt die minimal erreichbare Temperatur, bei einer Aufsättigung der angesaugten Verdichterluft auf 100% relative Luftfeuchte am Verdichtereintritt.

$$\eta = \frac{T_{amb} - T_{v1}}{T_{amb} - T_{WetBulb}} \quad (3)$$

## 2 Auswirkung auf die Regelung der GT

Wie unter 1) beschrieben ist es nicht möglich die Verdichtereintrittstemperatur meßtechnisch zu bestimmen. Folglich kann die Abkühlung aufgrund des EVAP-Effektes nicht bestimmt werden. Das Verhalten des ATK-Reglers wird an dem nachfolgenden Beispiel erörtert:

### Annahmen:

TATK=500°C (zu regelnder Festwert)

TAT=510°C (gemessen)

TT1=1060°C (mit der ATK von 500°C unterstützte konstante ISO-Turbineneintrittstemperatur)

### Fall 1: Trocken, kein WetC

$T_{v1}=20^\circ\text{C}$  (gemessen)

Nach Gleichung 1 berechnet sich die ATK zu  $T_{ATK}=510^\circ\text{C} - 0.46 \cdot 20 = 500.8^\circ\text{C}$ .

Der Regler würde in diesem Fall die Brennstoffmenge reduzieren, bis sich rechnerisch eine ATK von 500°C einstellt. Da hier die  $T_{v1}$  richtig gemessen wird, beträgt die TT1,ISO=1060°C

### Fall 2: Wet Compression, Thermoelemente unterhalb des Spray Racks angeordnet

Wassertemperatur=10°C

$T_{v1}=10^\circ\text{C}$  es wird angenommen, dass an den Thermoelementen eine falsche Temperatur wegen der Wasserbenetzung gemessen wird. Die minimal gemessenen Temperatur ist dann die Wassertemperatur

Nach Gleichung 1 berechnet sich die ATK zu  $T_{ATK}=510^\circ\text{C} - 0.46 \cdot 10 = 505.4^\circ\text{C}$ .

Der Regler würde in diesem Fall die Brennstoffmenge reduzieren, bis sich rechnerisch eine ATK von 500°C einstellt. Da hier die  $T_{v1}$  zu niedrig gemessen wird, korrigiert der Regler um 5,4°C. Die GT wird damit unterfeuert ( $TT1_{ISO} < 1060^\circ\text{C}$ ). Die Anlage wird allerdings deutlich überfeuert, wenn die Wassertemperatur und damit der an den Thermoelementen gemessene Wert größer ist als die Außentemperatur. Da auf dieser Basis keine Regelung aufgebaut werden kann ist es zwingend erforderlich die Thermoelemente vom ursprünglichen Platz am Verdichtereintritt auf eine Position oberhalb des WetC Spray Racks zu verlegen (Fall 3)

### Fall 3: Wet Compression, Thermoelemente oberhalb des Spray Racks angeordnet

Wassertemperatur=10°C

Tamb=20°C Die Verlagerung der Thermoelemente auf eine Position oberhalb des Spray Racks erlaubt es die Umgebungstemperatur zu messen (Tamb).

Tv1= ?°C Die richtige Verdichtereintrittstemperatur, die zur Regelung der ATK benötigt wird kann nicht direkt bestimmt werden (s. 1). Sie ist eine Funktion der Luftfeuchte in der angesaugten Luft aus der Umgebung und der Aufsättigung der angesaugten Luft auf dem Weg von dem Spray Rack zum Verdichtereintritt. Dabei gilt: Je geringer die relative Luftfeuchte der angesaugten Umgebungsluft und je höher der Wirkungsgrad der Aufsättigung, desto geringer ist die reale Tv1 (und umgekehrt).

Mangels Kenntnis der tatsächlichen Tv1 wird zur Regelung Tamb genutzt. Nur für den Fall, dass die Aufsättigung der Luft mit Wasser auf dem Weg vom Spray Rack zum Verdichtereintritt gleich 0 ist ( $\eta=0$ ), stimmen Tamb und Tv1 überein (Tamb=Tv1).

Nach Gleichung 1 berechnet sich die ATK zu  $T_{ATK} = 510^\circ\text{C} - 0.46 \cdot 20 = 500.8^\circ\text{C}$ .

Der Regler würde in diesem Fall die Brennstoffmenge reduzieren, bis sich rechnerisch eine ATK von 500°C einstellt.

In der Realität muß davon ausgegangen werden, dass immer ein gewisser Anteil des eingespritzten Wassers im Ansaughaus evaporiert ( $\eta>0$ ), so dass die reale Tv1 immer kleiner ist als Tamb (Tv1<Tamb). Daraus resultiert, dass bei Verwendung von Tamb als Ersatzgröße für die unbekannte Tv1 die GT auf jeden Fall überfeuert wird (TT1ISO>1060°C)!

## 3 Verbesserung der Regelung zur Vermeidung von Überfeuerung

Das Ziel der ATK Regelung im Trockenem und im WetC Betrieb ist es eine vorgegebene Turbineneintrittstemperatur zu unterstützen und eine Überfeuerung der GT zu verhindern. Wie oben beschrieben funktioniert die ATK Regelung ausschließlich im trockenen Fall 1. Im Fall von Wet Compression muß die Regelung verändert werden.

### 3.1 Wet Bulb Regelung

Wie sich im Kapitel 2 gezeigt hat, kann die Tv1 nicht direkt gemessen werden. Eine zuverlässige Meßgröße ist Tamb (Anordnung der Thermoelemente oberhalb des Spray Racks). Wie sich allerdings im Fall 3 gezeigt hat, wird die GT zwangsweise überfeuert, wenn Tamb als Ersatzgröße für die ATK Berechnung verwendet wird. Die Regelung für den WetC Betrieb ist deshalb aus Sicherheitsgründen (vermeiden von Überfeuerung) auf einer „Wet Bulb“ Regelung aufzubauen. Oberhalb des Spray Racks sind dafür Thermoelemente zu plazieren, mit denen Tamb gemessen wird. Zusätzlich ist eine Feuchtemessung zu installieren, die die relative Luftfeuchte der aus der Umgebung angesaugten Verdichterluft bestimmt. Mit diesen Größen (Tamb und relative Luftfeuchte) kann rechnerisch die minimal auftretende Temperatur am Verdichtereintritt bestimmt werden. Diese sogenannte Wet Bulb Temperatur wird aus Diagrammen bestimmt, die in elektronischer Form direkt in der Messtechnik abgebildet sind. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit Kombigeräte zu nutzen, die sowohl Temperatur und Feuchte messen und daraus die Wet Bulb Temperatur bestimmen können. Die Regelungsgleichung für die ATK lautet dann:

$$T_{ATK} = T_{AT} - 0.46 \cdot T_{\text{WetBulb}}$$

Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass unabhängig vom tatsächlichen EVAP-Wirkungsgrad  $\eta$ , die Berechnung der ATK auf einer fiktiven minimalen

Verdichtereintrittstemperatur basiert ( $\eta=100\%$ ). Es wird damit sichergestellt, dass die GT auf keinen Fall überfeuert werden kann!

### 3.2 Modifizierte Wet Bulb Regelung

Sollte der Wirkungsgrad in der Realität  $\eta < 100\%$  sein, wird die Anlage zwangsläufig unterfeuert. Dieser Zustand stellt einen sicheren Betrieb dar, der allerdings nicht die maximal mögliche Performance der GT unterstützt. Es ist deshalb denkbar die Wet Bulb Regelung zu modifizieren, indem ein Wirkungsgrad für den EVAP-Effekt angenommen und in die ATK Regelung implementiert wird. Der zu erwartende EVAP Effekt kann aus Versuchen und /oder Berechnungen abgeschätzt werden. Die Gleichung für die ATK Regelung ist wie nachfolgend beschrieben zu erweitern. Durch Auflösen der Gleichung 3 und einsetzen in Gleichung 1 erhält man:

$$T_{ATK} = T_{AT} - 0.46 \cdot [T_{amb} - \eta \cdot (T_{amb} - T_{WetBulb})]$$

TAT wird unverändert gemessen,  $T_{amb}$  wird direkt gemessen mit den Thermoelementen oberhalb des Spray Racks und  $T_{WetBulb}$  aus der Information  $T_{amb}$  und relativer Luftfeuchte berechnet. Mit dieser Regelung ist es möglich, sich den realen Bedingungen anzupassen, den sicheren Betrieb der GT herzustellen und ein Über- wie Unterfeuern der GT zu vermeiden.

## 4 Zusammenfassung

Mit der Einführung der Wet Bulb Regelung bzw. der modifizierten Wet Bulb Regelung ist es möglich die Siemens PG Regelung basierend auf der ATK als Regelgröße beizubehalten.

Mitbewerber, die Wet Compression an V-GTs einbauen und die Wet Bulb Regelung nicht berücksichtigen, werden die GT zwangsläufig überfeuern

## 5 Skizze

Einsatz von kombinierten Meßgeräten zur Messung der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und zur Berechnung der Wet Bulb Temperature

Die bestehenden Thermoelemente, werden nicht verwendet, da im WetC Betrieb in Folge von Wasserbenetzung falsche Temperaturen gemessen werden

